Dominique Paret
Hassina Rebaine

Réseaux de communication pour systèmes embarqués

CAN, CAN FD, LIN, FlexRay, Ethernet…

2e édition

DUNOD

Cet ouvrage a été traduit et publié en anglais et en coréen (Corée du Sud).

Toutes les marques citées dans cet ouvrage sont des marques déposées par leurs propriétaires respectifs.

ISBN 978-2-10-070700-3

TABLE DES MATIÈRES

D

Safe-by-Wire
Communications RF

E

Annexes

AVANT-PROPOS

À ce jour, globalement, les réseaux de communication multiplexés tels que CAN, LIN, FlexRay et autres représentent un domaine industriel mature, et seuls quelques pans nouveaux tels que les systèmes *X-by-Wire* et Ethernet Automobile finissent de s'affiner.

Travaillant dans ce domaine depuis de nombreuses années, M[me] Hassina Rebaine, responsable de la formation technique chez *Vector Informatik France,* et moi-même Dominique Paret, après de longues années chez NXP, fondateur et directeur de *dp-consulting*, ne pouvions manquer de communiquer sur ces sujets. En effet, à ce jour peu d'informations et de formations techniques de base et applicatives sont disponibles pour les ingénieurs, les techniciens, et les étudiants. Nous espérons que cet ouvrage comblera, du moins partiellement, ce manque.

Comme d'habitude nous avons attendu un long moment avant d'écrire cette nouvelle édition. En effet, de nombreuses nouveautés sont apparues, accompagnées de leurs sempiternels effets d'annonces associés, claironnant par monts et par vaux que « tout est bon, tout est beau ». Nous avons donc préféré attendre quelque temps, afin que ces effets retombent et que l'horizon commence à se dégager de toute affirmation de ce type, ce qui, hélas, a pris comme d'habitude un certain temps.

Le but de cet ouvrage est donc d'offrir, à une date donnée, le b.a.-ba le plus complet de ce domaine en pleine évolution. Par ailleurs ce livre n'a pas vocation à être une encyclopédie, mais plutôt une longue et dense introduction technique à ce sujet – et non une traduction littérale de ce que chacun d'entre vous peut trouver sur le web ! Il est dense, dans le sens où tous les « vrais » sujets de ces applications (principes, composants, normes, applications, sécurité, etc.) sont abordés concrètement. Pour les nouveaux venus dans ce domaine, il offre des vues conceptuelles et applicatives globales de ces différents protocoles.

Sachant que cette branche est en pleine évolution, nous avons conscience qu'il sera nécessaire de réactualiser à nouveau le contenu de cet ouvrage d'ici quelques années. En attendant, les bases et les principes fondamentaux seront au moins posés !

Par ailleurs, nous avons fait un gros effort pédagogique afin que le lecteur puisse faire à tout instant la liaison entre théorie, aspects technologiques, aspects économiques, etc.

Pour compléter cet avant-propos, sachez qu'il existe d'autres ouvrages parus chez le même éditeur intitulés *Le bus CAN – Applications, Les réseaux multiplexés* et *FlexRay et ses applications* qui complètent celui-ci, en traitant plus spécifiquement des couches applicatives et des détails de leur mise en œuvre.

En attendant, nous vous souhaitons une bonne et fructueuse lecture… et surtout faites-vous plaisir car, sachez que nous n'avons pas écrit cet ouvrage pour nous mais pour vous !

Remarque très importante

Dès à présent, nous désirons attirer l'attention des lecteurs sur le fait important que, pour couvrir correctement le sujet des réseaux et bus multiplexés, cet ouvrage décrit de très nombreux principes techniques brevetés, soumis à exploitation de licences et de droits associés (codages bit, techniques de communication, etc.), qui ont déjà été publiés au sein de communications techniques professionnelles officielles, ou lors de conférences ou de séminaires publics… Leur usage doit impérativement être fait selon les règles légales en vigueur.

Mode d'emploi de cet ouvrage

Nous vous conseillons de lire les quelques lignes qui suivent avant de rentrer dans les détails techniques qui seront exposés au cours des prochains chapitres.

Tout d'abord, il faut savoir que cet ouvrage comporte de nombreux sujets qui s'entrechoquent, se télescopent et se recoupent, ce qui ne rend pas simple la construction d'un plan. Il a donc fallu procéder à un choix de présentation globale et pédagogique, afin que vous, Lecteur, puissiez vous repérer aisément dans tous ces principes de communication et de nouveaux protocoles émergents, que vous allez découvrir et utiliser dans les années à venir.

L'introduction a pour but de vous mettre l'eau à bouche, au travers d'une application qui nous touche quotidiennement, l'automobile, les systèmes embarqués et leurs mystères. Évidemment, tout ce que nous avons écrit dans cet ouvrage est généralisable aux applications industrielles de tout acabit (commande de machines-outils, de ligne de productions, avionique, immotique, etc.).

Première partie A

Les chapitres 1 à 7 dédiés aux protocoles *event triggered* ont pour but de remettre les pendules à l'heure en ce qui concerne le protocole CAN et la nouvelle introduction du protocole CAN FD ainsi que toutes les subdivisions possibles des couches physiques et tout ce qui touche aux problèmes de conformité. Une partie de cet exposé est déjà connue de certains d'entre vous, mais de très nombreux compléments concernant les couches physiques ont été ajoutés ou remis au goût du jour. On ne peut parler de tout cela sans évoquer (brièvement) les couches applicatives CAL, CANopen, OSEK, AUTOSAR et les outils *hardware* et *software* nécessaires pour supporter l'aide au développement, à la vérification, à la production, à la maintenance, etc. Jusque-là rien de plus normal…

Nous décrirons également en détail le protocole LIN, son fondement, ses particularités, ses problèmes et la manière de les résoudre. Le LIN est généralement

présenté par ses concepteurs comme un sous-bus du CAN, le « sous » n'étant pas péjoratif, mais purement fonctionnel !

Deuxième partie B

En introduction à cette partie nous évoquerons les limites fonctionnelles et applicatives du CAN, et nous ferons un point entre les systèmes de communication déclenchés temporellement (*time triggered*) et toutes les implications que des utilisations, dites de temps réels sécuritaires, engendrent.
Nous serons amenés à présenter le fonctionnement et le contenu des protocoles tels que TTCAN, FlexRay, ainsi que pour ces derniers des applications de type *X-by-Wire*… en version décodée : adieu la mécanique, « tout par fil » !
Nous décrirons ensuite rapidement les différentes contraintes et possibilités de passerelles entre les réseaux présentés en première partie et de nouveaux venus, en expliquant comment sont conçus et constitués les *fail safe - System basis chips* (SBC) et autres passerelles *gateways*.

Troisième partie C

Cette troisième partie présente les protocoles dédiés à la distribution de l'ensemble audio-vidéo, le terme vidéo étant pris ici au sens le plus large possible c'est-à-dire couvrant la télévision conventionnelle, l'aide à la navigation, la gestion et l'affichage des nombreuses caméras d'aide à la conduite (ADAS), les détections de piétons, etc. donc nécessitant de très haut débits (100 Mbit/s). Nous présenterons donc le protocole MOST déjà utilisé depuis de nombreuses années et nous effectuerons une très longue introduction technique de l'application ETHERNET dans le domaine de l'automobile (… ce qui n'est pas simple !) en nous attardant notamment sur le contenu de l'OPEN Alliance et le concept de la solution BroadR-Reach.

Quatrième partie D

Pour terminer cette longue promenade en bus, nous évoquerons (succinctement avec seulement quelques détails sinon on friserait l'encyclopédie universelle) la nuée d'autres réseaux et protocoles qui côtoient ceux présentés dans les volets précédents dans un système embarqué tel qu'un véhicule automobile. Ce dernier sera à terme, selon certains, un élément de mobilité sûr et fiable, une annexe domestique (audio, vidéo, jeux, etc.) et une annexe du bureau ! À ce propos, nous évoquerons les liaisons séries filaires et non filaires internes au véhicule, en d'autres termes *urbi* (*Safe-by-Wire Plus*, CPL, etc.) et externes à celui-ci, *orbi* (télécommande *remote keyless entry*, entrée mains libres *passive keyless entry*, TPMS *Tire pressure monitoring system*, *tire identification*, GSM, Bluetooth, ZigBee et autres consorts).
Voici, et si la route vous paraît longue, … prenez le bus !

Remerciements

La branche des réseaux de communication multiplexés s'agrandit de jour en jour et de nombreuses personnes compétentes y travaillent. Par chance, j'ai l'occasion de croiser fréquemment beaucoup d'entre elles, aussi il m'est très difficile de remercier individuellement tout le monde.

Je tiens à dédier quelques remerciements spécifiques à de nombreux amis de NXP/Philips Semiconductors de Nimègue (Pays-Bas) et de Hambourg (Allemagne), avec lesquels j'ai le plaisir de travailler depuis de longues années sur le sujet et, prenant le risque de faire des jaloux, plus particulièrement à Matthias Muth, les nombreux « Hans » et autres collègues des Pays-Bas, les nombreux « Peter » et autres collègues d'Allemagne.

Pour terminer, je serais ingrat de ne pas remercier également les nombreux collègues de la profession, constructeurs automobiles et équipementiers, que je rencontre régulièrement, soit lors de réunions de travail, soit à l'ISO. Ils se reconnaîtront aisément, pour les remarques concernant la confection de cet ouvrage. Enfin, j'adresse de très grands remerciements à Mme Philipsen de NXP/Philips Semiconductors à Eindhoven, et à MM Henri Belda et Jean Philippe Dehaene de la société VECTOR Informatik France pour les nombreux documents et photos qu'ils ont eu la gentillesse de me fournir afin d'égayer cet ouvrage.

Dominique PARET
Meudon, le 16 décembre 2013.

INTRODUCTION

C'est quand même un comble que d'employer le mot « parallèle » dans un ouvrage dans lequel on ne parle que de liaisons séries, mais il est vrai qu'en parallèle des CAN, LIN et FlexRay, de nombreux autres protocoles de communication de type « série » ont vu le jour.
En complément des protocoles CAN HS, LS, LSFT, FD, nous allons consacrer plusieurs chapitres pour vous présenter d'autres grandes familles de protocoles et d'autres amis du CAN. Ils sont utilisés dans le monde des réseaux multiplexés « embarqués », que l'on rencontre dans les marchés automobile, aéronautique et industriel, et qui ont toujours des relations plus ou moins proches avec le CAN.
Ces autres liaisons séries sont dédiées à des applications de transport de données à débits soit plus lents, soit généralement plus rapides que le CAN. Il s'agit par exemple de transport de données numériques, de communications à hauts débits, de liaisons audio, vidéo, d'aide à la navigation, de sécurité, etc.
Afin de s'y retrouver, nous avons décomposé ces nouveaux venus en deux grands groupes : ceux dont les liaisons sont assurées par des éléments filaires « câblés » et ceux dont les liaisons sont assurées à l'aide de propagations d'ondes radiofréquences, bien connues en anglais sous le vocable de *wireless* . Les plus en vogue ont pour noms :

- en technologies « câblées » :
  - LIN,
  - TTCAN,
  - FlexRay,
  - *Safe-by-Wire*, IP5
  - I2C/D2B (ancien),
  - MOST,
  - IEEE 1394,
  - Ethernet automobile,
  - CPL (*powerline*);
- en technologies *wireless* :
  - Bluetooth,
  - ZigBee,
  - IEEE 802.11,
  - NFC,
  - RKE, PKE, *Passive Go*,
  - TPMS,

- TiD,
- etc.

Bien évidemment, chacun d'entre eux possède ses spécificités liées à son débit, sa distance de fonctionnement, ses possibilités, ses performances, son coût, etc. Ainsi, il est plus adapté à telle ou telle application. Le fin du fin serait bien sûr d'établir un tableau regroupant leurs principales propriétés sans aucun *a priori*, afin que chacun puisse trouver son bonheur selon ses besoins. Hélas, ce tableau n'est pas simple à réaliser, car il doit comporter de très nombreuses rubriques, car faute de renseignement sur un critère ou un autre, on risque de passer à côté du bon choix. Afin de vous aider à établir ce tableau selon vos propres critères, nous allons tout d'abord décrire rapidement avec le plus de détails possible les propriétés intrinsèques de chacun.

Pour des raisons évidentes de facilité et de compréhension, nous avons utilisé comme fil rouge des exemples d'applications liées au marché automobile. Nous continuerons à utiliser celui-ci comme support des exemples, mais en élargissant systématiquement à d'autres domaines leurs champs d'applications.

Partant de cela, et sachant que le probable *e-vehicule* (véhicule électronique) de demain sera simultanément conçu pour être un outil pour se déplacer confortablement et en toute sécurité, une annexe de la maison et une annexe du bureau, entrons dans le vif du sujet concernant les systèmes multiplexés embarqués, leur fonctionnement et leurs applications multiples. Pour cela, imageons l'ampleur du champ d'application de ces concepts en imaginant le devenir futuriste, et néanmoins très réaliste, d'un véhicule automobile.

Sur le principe, la fonction principale d'un véhicule automobile est de se déplacer, confortablement, et en toute sécurité. Ceci inclut :

- la motorisation,
- le freinage,
- la suspension,
- la gestion de l'habitacle : accès sécurisé (portières, coffre, etc.),
- le confort : unité de climatisation, réglage des sièges,
- la protection active/passive : *air bag*, etc.,
- la télématique,
- l'aide à la navigation, etc.

Remarquez que chacun de ces systèmes sous-tend généralement un réseau multiplexé dédié :

- pour le moteur et la boîte de vitesse : CAN HS, FlexRay,
- pour l'habitacle et le confort : CAN *low speed (fault tolerant)*,
- pour la protection : *Safe-by-Wire,* IP5.

De plus en plus, le véhicule devient une annexe ou une succursale de la maison, avec ses équipements « domestiques » hautement sophistiqués :

- audio,
- vidéo,
- jeux vidéo,
- téléphonie, etc.

Il devient de plus en plus également une annexe du bureau :

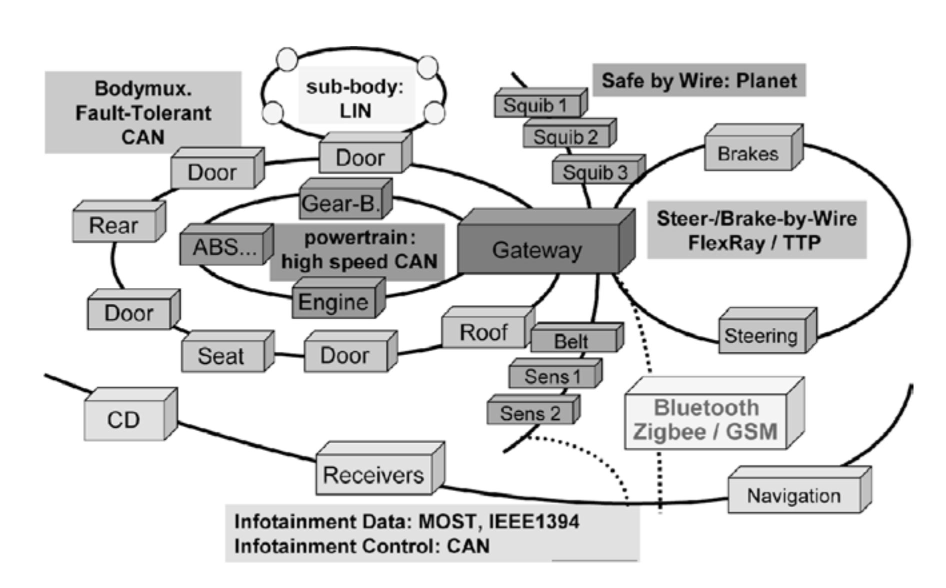
– imprimante à bord,
– voiture communicante :
  • GSM,
  • Bluetooth (à différents débits),
  • ZigBee,
  • NFC (*Near Field Communication*).

Tout cela entraîne des couches superposées de réseaux spécifiques et dédiés, et bien sûr de nombreuses passerelles entre ces réseaux dont vous trouverez de nombreux détails dans les chapitres suivants.

Le but de cet ouvrage est donc de vous entraîner dans les méandres de ces réseaux et de leurs interconnexions. Maintenant que vous voilà prévenu, mettons-nous à l'œuvre !

Infrastructure d'un véhicule

À ce jour, de très nombreuses couches de liaisons et de communications s'entrecroisent dans un véhicule. Il en est de même dans un avion ou dans tout autre système embarqué de haut niveau. Certes, pour ces derniers, certains réseaux utilisés sont différents, mais les problèmes restent sensiblement les mêmes. Afin de vous donner une idée plus précise de tout cela, la figure suivante présente, vu de très haut, un aperçu de l'architecture conventionnelle d'un véhicule presque actuel (c'est-à-dire demain matin… en 2020 !).



Urbi et *orbi* sont dans une auto…

Avant d'aller plus loin, il est nécessaire de faire une petite digression autour des applications *urbi* (internes) et *orbi* (externes) d'un système dans l'automobile ou le monde industriel. En effet, de nos jours, avec l'avènement grandissant des liaisons

radiofréquences, il est nécessaire d'inclure également dans cet inventaire les nouveaux protocoles de communication permettant de réaliser des réseaux « sans fil » (radiofréquence), de façon à pouvoir étendre le champ et les distances de communication. Très souvent, les réseaux commencent à être épris de certaines libertés métriques (distances de l'ordre de 10 à 50 m), hors tout cordon ombilical et les passerelles de type *wired/wireless* (câblé/sans fil) sont déjà légions sur le marché (par exemple les passerelles de type CAN/Bluetooth ou WiFi).

■ Les simples

Les protocoles les plus simples ont été élaborés pour des raisons de coût et de fonctionnalités. Bien entendu, les performances en termes de bande passante, de débit, de sécurité et de fonctionnalités sont plus restreintes. Parmi ceux-ci, les plus anciens, bien connus, sont les protocoles I2C, D2B et SPI et le LIN.

■ Les compliqués

Il s'agit de protocoles souvent très performants et très spécialisés, orientés vers des applications particulières.
Pour des applications câblées, il s'agit des protocoles TTCAN, FlexRay, *Safe-by-Wire* IP5, IEEE 1394, Ethernet, etc. Ce sont des réseaux rapides, performants, orientés applications dites temps réel, parfois auto-alimentés, sécurisés, redondants, etc., ainsi que des protocoles pour applications radiofréquences tels que DECT, Bluetooth, ZigBee, WiFi, etc.

En utilisation interne au véhicule, *urbi*

On trouve dès à présent, sous forme de « multiplexage câblé », de nombreux protocoles au sein d'un véhicule sur des véhicules haut de gamme ou sur des *concepts cars*. Chacun possède ses spécificités liées à son débit, à ses possibilités, à ses performances et à son coût. Les plus en vogue sont : CAN HS, LS, LSFT, FD, One Wire, TTCAN, LIN, I2C, MOST, IEEE 1394, Ethernet, CPL, FlexRay, *Safe-by-Wire*, etc.

■ Communications câblées

Commençons par le plus gros centre nerveux du système, le CAN.

□ CAN *high speed*

Comme indiqué sur la figure précédente, les liaisons de la partie motorisation, commande moteur (*power train*), boîte de vitesse (*gear box*) et freins (*brakes*) sont assurées à l'aide de liaison CAN *high speed*, du fait des nombreux échanges devant s'effectuer à débit rapide (250 kbit/s ou plus généralement 500 kbit/s et 1 Mbit/s). C'est historiquement le cœur du fonctionnement du véhicule et il est conçue en relation très étroite entre le constructeur automobile et ses plus proches équipementiers. Les développements des couches *hardware* et *software* associent des connaissances du sujet de longue date, des volontés marquées et des budgets de recherche & développement importants, car tous les participants travaillent sans cesse sur de nouveaux projets de véhicules incluant de nouveaux principes, de nouvelles messageries, etc.

□ CAN *low speed*

Cette couche de liaison est une couche périphérique de celle décrite ci-dessus. En effet, bien que de degré (supposé…) légèrement moindre, elle fait partie intégrante de la conception du véhicule. Ces liaisons desservent les nœuds situés principalement dans les zones dites d'habitacle (*body part*), et donc distantes de l'ensemble moteur précédent. Les valeurs conventionnelles des débits utilisés (62,5 et habituellement 125 kbit/s) couvrent les liaisons des nœuds de type les « ouvrants » (portes, toits ouvrants, coffres) et également le réglage des sièges, les liaisons avec la planche de bord intégrant l'autoradio, l'affichage classique de l'autoradio, la température interne/externe et l'ordinateur de bord (ces applications sont souvent à la limite entre *high* et *low speed* CAN).

Le fait de devoir gérer des incidents dus à des courts-circuits et des coupures d'éléments des liaisons qui ne risquent pas de mettre en défaut le fonctionnement global du réseau utilisé amène au système *fault tolerant*.

Notez que certains véhicules comportent jusqu'à 5 ou 7 réseaux CAN (*high* et *low speed*) physiquement non liés entre eux (de débits identiques ou non), ayant chacun un nombre de participants limité mais très dédiés, afin d'assurer des fonctionnalités très spécifiques ou encore de partager les risques de dysfonctionnement.

□ LIN

Le protocole LIN considéré par ses concepteurs comme un sous-bus du CAN est principalement utilisé pour les liaisons à bas débit (20 kbit/s maximum), afin de réduire le coût de nœuds (les performances requises pour ces nœuds sont faibles mais non stratégiques). Afin de mieux nous faire comprendre, citons l'exemple des commandes électriques de réglages, de chauffage et de repli du rétroviseur, à l'intérieur de la fonction « portière ». Remarquons l'arrivée juxtaposée au FT LS CAN du LIN dans le « haut de colonne » de direction, zone dans laquelle sont souvent concentrés de nombreux organes de commandes au volant (avertisseurs, changement de direction, commande de phares, réception de télécommande, réception des systèmes de surveillance de pression des pneumatiques – TPMS, etc.).

Notez également que certains véhicules comportent jusqu'à 5 ou 6 bus LIN physiquement non liés entre eux (de mêmes débits ou non), ayant chacun un nombre de participants limité mais très dédiés afin d'assurer des fonctionnalités très spécifiques. Évidemment, tout cela demande des passerelles (*gateways*) entre tous les bus que nous venons de citer.

□ CPL – *Current power line*

Pour les mêmes applications que ci-dessus, les liaisons CPL (*Current power line*) peuvent permettent d'envoyer des données et des ordres de commande à des systèmes (à bas débit, de l'ordre de 20 à 50 kbit/s maximum), à l'aide de porteuse HF modulée en ASK ou FSK, elle-même superposée au fil « + V_bat » transportant l'énergie à tous les modules du réseau. Ici aussi, le but principal de ces applications est la réduction des coûts. Ex : commande d'essuie-glace, liaison inter essuie-glace.

☐ *X-by-Wire, FlexRay*

Les communications basées sur les protocoles TTCAN et FlexRay sont très rapides et de type « temps réel ». À ce jour, les organes commandés selon ces protocoles sont ceux dont on souhaite diminuer le poids, le volume, et auxquels on désire donner davantage d'intelligence, par exemple les systèmes de colonne de direction, les organes de freins, d'embrayage, de suspension, de tenue de route, etc. Ce type de communication demande des débits élevés (de l'ordre de 7 à 10 Mbit/s) et, selon les applications envisagées, des redondances matérielles et logicielles. Ici aussi, la présence de passerelles est une nécessité entre les réseaux CAN et FlexRay.

☐ *Safe-by-Wire*

Les liaisons point à point des systèmes de commande de sécurité de déclenchement d'*airbags*, des dispositifs de pré-tension des ceintures de sécurité, etc., devraient disparaître à terme, et être remplacées par une topologie de bus. Ces liaisons, reliées directement à la sécurité physique des occupants du véhicule, doivent être aptes à fonctionner lors de l'impact du véhicule et comportent des notions de rapidité évidentes entre les informations détectées (détecteur de choc, accéléromètre, centrale inertielle, etc.) et les organes de déclenchement des squibs, de pré-tensionneurs des ceintures, etc.

☐ Audio-vidéo

La distribution de l'audio et de la vidéo se généralise au sein des véhicules automobiles. En fonction de l'évolution des technologies, nous avons vu s'établir les réseaux de communications transportant ces informations à l'aide d'I2C puis D2B, puis de MOST à ce jour, et bientôt d'Ethernet à haut débit. Voici quelques mots d'introduction aux applications audio-vidéos supportées par ceux-ci.

Bus I2C

I2C, *Inter integrated circuit*, l'ancêtre… est toujours utile, principalement pour assurer certaines liaisons d'ordres de commande (arrêt, marche, changement de piste, etc.) entre l'autoradio et le lecteur de CD.

MOST

MOST, *Media oriented systems transport*, est un réseau ayant pour mission première d'assurer la distribution audio dans le véhicule. Il est également utilisé pour des applications vidéo au sein d'un véhicule, lorsque les débits numériques peuvent être adaptés aux applications embarquées (par exemple MPEG2).

IEEE 1394

L'IEEE 1394 (et son dérivé IDB) permet d'atteindre des débits encore plus élevés. Bien évidemment, il permet de remplir les mêmes applications que le MOST, et de multiplexer différentes sources audio-vidéo sur un même support câblé, par exemple :

- les informations provenant de la famille des CD audio, vidéo, CD-ROM de cartes routières de support à la navigation ;
- tous les types d'informations vidéo devant tôt ou tard être affichées sur un écran, l'affichage vidéo, la télématique/bureautique, les jeus vidéo, les DVD, la

localisation via GPS, l'aide à la navigation soit telles quelles, soit complémentées à l'aide d'informations dynamiques ramenées par une liaison GSM.

□ **Ethernet automobile**

Dans cette nouvelle édition nous avons consacré un long chapitre, le 13, à l'utilisation spécifique de ce mode de communication en systèmes embarqués.

■ **Communications radiofréquences**

Toujours dans les applications *urbi*, internes au véhicule, il existe de nombreuses applications utilisant un support radiofréquence pour assurer les communications numériques.

□ **Récepteurs radiofréquences pour toute application**

Radio

Commençons par la plus conventionnelle des réceptions, celle de la radio AM/FM/numérique/… avec intégration des antennes ou non dans les pare-brise ou encore dans les systèmes de dégivrage arrière. Rien que du conventionnel ici, à l'exception de commandes vocales (synthèse et/ou reconnaissance de paroles) pour le réglage des stations et des volumes, etc.

Immobiliseur ou antidémarrage

La fonction « immobiliseur » (dispositif d'antidémarrage du véhicule) utilisant des transpondeurs RF fonctionnant sur une porteuse à 125 kHz est bien connue depuis des années. Elle fait communiquer, à quelques kbit/s sous communications cryptées, un élément fonctionnant sans contact (transpondeur), situé dans la tête de la clé de contact (ou dans un badge), afin de libérer le fonctionnement de la partie allumage/injection du véhicule dans laquelle est situé le décryptage (en couche enterrée) et d'autoriser le démarrage du moteur.

□ **Bluetooth**

Bluetooth est à ce jour bien connue. Il est facile de l'utiliser dans le périmètre intérieur d'un véhicule.

Le premier exemple, largement répandu, est celui de l'emploi des « oreillettes » permettant de continuer d'utiliser un téléphone portable en conduisant. D'autres exemples résident dans la construction de « pico » réseaux à l'intérieur d'un véhicule, en reliant tous les modules informatiques/bureautiques embarqués (imprimante pour e-mail, etc.), mais également, en limite *urbi/orbi* :

- des applications aux services d'accueil des garages/succursales/concessions/etc. ;
- des applications aux systèmes d'entrée dits « mains-libres » (*passive entry*) ;
- des applications à des systèmes antivol ou anti-intrusions, basés sur des principes de *relay attacks*, etc.

Passons maintenant aux applications radiofréquences devant assurer un pont *urbi/orbi* entre l'intérieur du véhicule et le monde extérieur.

■ **Communications radiofréquences**

□ **Télécommande**

De nos jours, les télécommandes fonctionnent à l'aide de liaisons radiofréquences

UHF (principalement dans les bandes des 433 MHz et 866 MHz). Les modulations de l'onde porteuse sont effectuées soit en ASK (OOK, *On off keying*), soit en FSK. Les débits numériques de communications sont de l'ordre de quelques (dizaines de) kilobauds et les protocoles utilisés sont généralement propriétaires. Les messages transmis par ces télécommandes, également cryptés, habituellement selon le cryptage utilisé par le système servant à l'immobiliseur, sont ensuite transcodés en trames CAN lors de leur réception, afin d'atteindre les décodeurs. Le même ensemble électronique effectue le décryptage des signaux provenant de la fonction immobiliseur, et ceux de la télécommande présente dans la clé ou le badge.

□ **PKE – *Passive keyless entry – Passive go***

Les systèmes PKE et *Passive go* cachent ce que l'on appelle les fonctionnalités « entrées mains-libres » et « démarrage via un bouton » (le tout donc, sans clé apparente). Ces liaisons RF, de types bidirectionnelles, montante en provenance du véhicule vers la clé, fonctionnant sur une porteuse à 125 kHz à un débit de quelques kbit/s. Dans le sens de la liaison descendante, de la clé/badge vers le véhicule, elle fonctionne à l'aide d'une porteuse se situant généralement dans la bande des 433 MHz. Le protocole de communication (généralement propriétaire) doit être apte à gérer et à traiter les collisions de messages et/ou de porteuse car, le tout se passant mains-libres, plusieurs passagers équipés de badges (M., Mme, etc.) peuvent se présenter simultanément autour du véhicule.

□ **TPMS – *Tyre* (ou *Tire*) *Pressure Monitoring Systems***

Les systèmes TPMS ont pour mission de mesurer les pressions individuelles des roues, de corriger leurs valeurs en fonction de la température des pneus et de les transmettre au conducteur, en émettant ces informations/alertes en RF (à 433, 868 ou 915 MHz selon les pays) toutes les une ou deux minutes quand tout va bien, et beaucoup plus fréquemment en cas de problème.

□ **Tyre iD – identification des pneus**

Attention à ne surtout pas confondre « l'identification des pneus » avec le sujet précédent TPMS ! Nous évoquons ici ce qui touche à l'identification RF à 900 MHz[1] des pneus (type, modèle, lieu de fabrication, neuf, rechapé, etc.) et non à la mesure de leur pression.

■ **Les *wireless networks***

Pour terminer ce tour d'horizon, évoquons rapidement les réseaux sans fils fonctionnant en radiofréquences dit *wireless networks*.

□ **GSM**

Au-delà de la simple liaison de téléphonie mobile bien connue, ce type de liaison RF permet également l'ouverture à de nombreux nouveaux services.

□ **GSM et Bluetooth**

Selon les régulations locales en vigueur dans les différents pays de notre belle planète, il est possible d'émettre différents niveaux (classes 1, 2, 3) de puissances

1. RFID, voir de nombreux ouvrage du même auteur chez Dunod.

EIRP, entraînant par voie de conséquence différentes distances de communication (de quelques mètres à quelques centaines de mètres). Ceci est suffisant pour échafauder des applications *orbi* !

☐ IEEE 802.11x

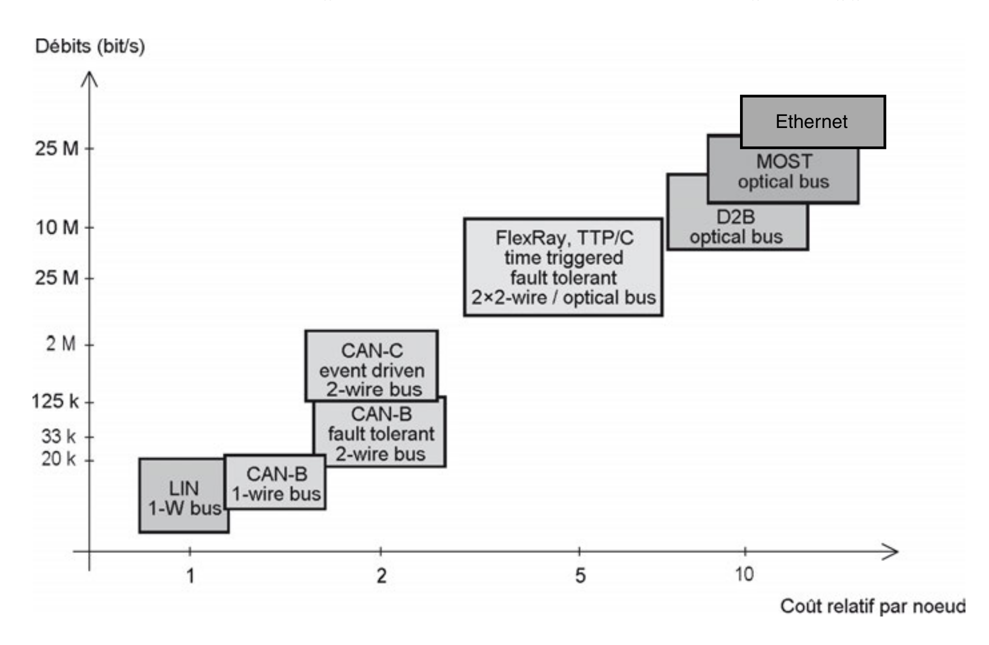
Le concept IEEE 802.11x, connu également sous le nom de *WiFi*, ne vise pas les mêmes applications que Bluetooth mais, bien malin celui capable à ce jour de prédire avec certitude les répartitions applicatives futures de ces deux concepts !

☐ NFC *(Near Field Communication)*

Petit dernier de la famille radiofréquence, le NFC (*Near Field Communication* ou communication en champ proche) permet d'effectuer des communications sur une distance de quelques centimètres. Que vient faire ce concept dans la partie *orbi* avec une distance si faible de communication qui devrait le placer directement dans la famille des *urbi* ? La réponse… au chapitre 15 !

Positionnement en termes de performances/coûts

Avant de conclure cette courte introduction à ces nouveaux protocoles, donnons d'ores et déjà leur positionnement, actuel et dans un futur proche, en termes de rapport performances/coûts, utilisations/importances relatives des uns par rapport aux autres, et consommations annuelles et cumulées. La figure suivante illustre la dépendance coût/débit de ces concepts. On n'a rien sans rien : plus on veut aller vite, plus c'est cher. Ce n'est pas nouveau ! Il est bien évident que les coûts relatifs indiqués en abscisse ne sont donnés que pour information avec les réserves d'usage. Ils sont à réactualiser au quotidien en fonction de vos souhaits précis applicatifs.



A

Protocoles event triggered CAN, CAN FD, LIN

Nous allons vous parler ici de protocole et de bus CAN (*Controller Area Network*)[1].

Encore un protocole et un système différent ! Eh bien, sachez que ce n'est pas si facile de mettre tout le monde d'accord, surtout lorsque chacun exprime des souhaits et des exigences techniques particulières, et que des marchés importants sont suffisants pour justifier et optimiser chaque concept (comprenez réduire le coût évidemment !). Voici donc un protocole série à ajouter à notre arsenal déjà important de réseaux locaux (LAN).

Tel que le décrivent les normes ISO, le CAN est « un protocole de communication série qui supporte de façon efficiente la distribution de commandes en temps réel avec un haut niveau de sécurité. Ses domaines de prédilection couvrent généralement les applications de réseaux à haut débit, haute fiabilité de transmission et à concept de câblage multiplexé bas coût ». Vous voilà donc averti…

Nous allons tout au long de cette partie décrire le protocole CAN et quelques-unes de ses principales applications.

Il faut bien avouer que ce concept n'a pas vu le jour en quelques heures, qu'il est le fruit de longues recherches et expérimentations et que cela continue. Évidemment, nous pourrions passer directement à la description de son fonctionnement, mais nous pensons qu'il manquerait quelque chose de profond dans la connaissance des problèmes liés aux protocoles utilisés dans les réseaux locaux.

En effet, fréquemment certaines idées semblent venir à l'esprit « naturellement », mais souvent les grandes illuminations des méandres de nos cerveaux sont liées à une suite d'événements n'ayant apparemment pas de relations entre eux, mais qui sont en fait bien organisés.

Aussi, avant de vous faire découvrir l'intimité du CAN conçu par la société R. Bosch Gmbh, nous avons souhaité consacrer un chapitre d'introduction aux grandes lignes directrices de ce protocole, qui tentera de décrire le cheminement de pensée parcouru par de nombreux chercheurs pour arriver à l'élaboration finale de ce projet.

Cette démarche fut remarquable et, malgré que cette introduction ne se veuille pas essentiellement technique, nous vous recommandons d'en prendre connaissance, car elle vous permettra certainement de mieux comprendre les tenants et aboutissants qui ont amené à élaborer ce protocole si particulier, et qui en ont fait son succès, tant dans le domaine de l'automobile que dans les domaines industriels et professionnels.

Remarque

Afin de rendre à César ce qui lui appartient, nous avons choisi de bâtir le développement de cette introduction selon un canevas similaire à celui qu'utilisa l'un des pères du CAN, le professeur Uwe Kiencke de l'université de Karlsruhe (Allemagne), lors d'une excellente présentation à l'*International CAN Conférence* du *CAN in automation* en 1994 (Mainz, Allemagne)… Comme quoi, il peut encore arriver d'être prophète en son pays !

1. À ce sujet, nous avons laissé le vocable « bus CAN » dans cet ouvrage, non par ignorance mais uniquement afin d'éviter les possibles équivoques, en langue française, avec les fameux Convertisseurs Analogiques Numériques, et par conséquence un positionnement probablement faux de l'ouvrage, par exemple dans les moteurs de recherche sur le Web. Pour conclure sur ce sujet, le terme normal à utiliser est « CAN », en se rappelant que le terme « bus » ne représente qu'une topologie possible d'utilisation parmi tant d'autres.

1 • LE CAN – GÉNÉRALITÉS

Un bus n'est toujours qu'un bus, mais il y a « bus » et « bus » !

En effet, de bus en bus, les problèmes à résoudre se perpétuent, mais les caractéristiques différentes des champs d'applications visés modifient l'ordre hiérarchique des paramètres à prendre en compte, et impliquent que soient développés de nouveaux concepts, afin de trouver des solutions élégantes aux difficultés soulevées.

Énumérons rapidement les problèmes, quasi immuables, rencontrés dans les applications de réseaux de communication :

– les notions d'accès aux réseaux, incluant – bien évidemment les problèmes de conflits et d'arbitrage, les temps de latence ;
– les aspects déterministes ou probabilistes et leurs relations avec les notions de systèmes temps réel ou déclenchés par des événements ;
– les notions d'élasticités (« scalabilité ») d'un réseau ;
– la sécurité des informations transportées ou, en d'autres termes, la stratégie de gestion des erreurs et donc, leur détection, leur signalisation et leur correction ;
– les questions de topologies, de longueurs et de débits ;
– les questions de supports physiques ;
– les pollutions radioélectriques, etc.

1.1 Notions d'accès au réseau et d'arbitrage

De nos jours, les systèmes de commandes en temps réel « distribués », basés sur un *operating system* situé à l'intérieur d'un seul processeur, interconnectés par un réseau de communication vers des processeurs distribués, apportent une extension importante aux systèmes « parallèles ».

Au-delà du simple échange de données, les traitements doivent être synchronisés, c'est-à-dire que leur exécution doit suivre certaines séquences logiques intercorrélées. Dans ces systèmes, les messages concernant la synchronisation sont généralement courts. Ils peuvent être créés par n'importe quel traitement ou événement dans le système, et doivent être simultanément récepteurs, de manière à préserver la consistance d'un traitement parallèle.

Toutes les stations génèrent indépendamment des messages concernant leurs tâches respectives à des instants aléatoires (événementiels).

Les requêtes de transmission rentreront en compétition pour gagner l'accès au medium, ce qui entraîne des temps de latence[1] plutôt variables que constants.
Examinons les différents principes d'arbitrage mis en lice.

1.1.1 CSMA/CD contre CSMA/CA

■ CSMA/CD

Pour des raisons historiques, la procédure d'arbitrage de type *Carrier sensor multiple access/Collision detect* (CSMA/CD) fut d'abord envisagée pour résoudre de tels conflits.
Avec un tel système, lorsque plusieurs stations tentent d'accéder simultanément au medium du réseau quand celui-ci est au repos, un message de contention est détecté. La transmission est alors arrêtée et toutes les stations se retirent du réseau. Après un certain laps de temps, différent pour chaque station, chaque station tente à nouveau d'accéder au réseau.
Il est bien connu que de telles annulations de transfert de données pendant la contention diminuent par principe même la capacité de transport du réseau. Il se peut même qu'au moment de crêtes de trafic, le réseau soit totalement bloqué, ce qui n'est pas acceptable lorsqu'on envisage d'utiliser ce réseau pour satisfaire des applications dites de « temps réel ».

■ CSMA/CA

À la lueur des problèmes soulevés ci-dessus, un autre principe (parmi d'autres) fut examiné avec attention. Il s'agit du *Carrier sensor multiple access/Collision avoidance* (CSMA/CA).
Ce dispositif fonctionne à l'aide d'une contention réalisée non plus au niveau de la tentative de la prise de bus mais au niveau du bit lui-même (*bitwise contention* – gestion du conflit pendant la durée du bit). C'est ce principe qui a été retenu dans le CAN et dont nous décrirons le fonctionnement en détail tout au long de cette partie.
Dans ce cas, il est possible d'éviter les conflits d'accès au bus, en assignant un niveau de priorité à chacun des messages transportés.
En cas de contention, le message dont la priorité est la plus élevée gagnera toujours l'accès au medium. Il va de soi que les temps de latence des messages dépendront alors fortement des niveaux de priorité choisis et attribués à chacun.

1.1.2 Le problème des temps de latence

Lors de l'étude complète d'un système, afin de prendre en compte tous les paramètres, le temps de latence se définit généralement comme la durée qui existe entre l'instant indiquant la requête d'une transmission et le début réel de l'action engendrée par celle-ci.
Pour l'instant, et de façon à être simple, nous définirons le temps de latence d'un message (t_{lat}) comme la durée qui existe entre l'instant indiquant la requête d'une transmission et le début réel de celle-ci.

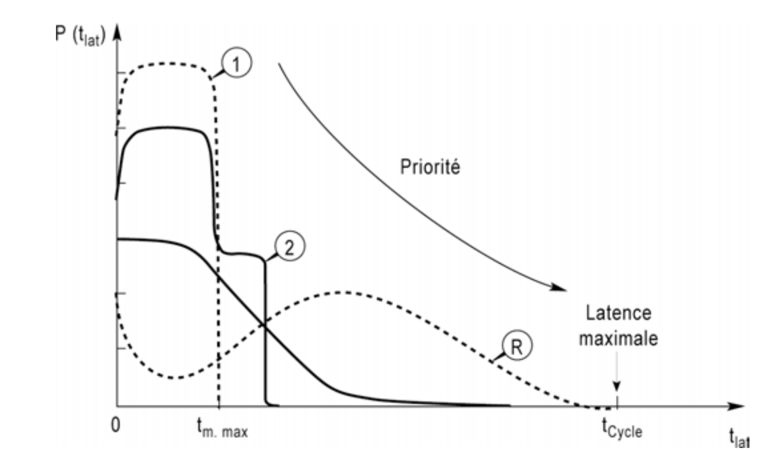
1. *Cf.* plus loin *Petite rubrique « enrichissez votre vocabulaire »*.

Cette notion est généralement diffuse et touche à des calculs statistiques (ordonnancement) longs et fastidieux, principalement dans les systèmes dit « temps réel ». La raison est simple : seuls quelques messages spécifiques ont réellement besoin d'avoir des temps de latence garantis et ce, pendant les crêtes de trafic. Il est donc nécessaire de considérer deux sortes de messages :

– *R* = les messages dont la latence doit être garantie ;
– *S* = les autres ;
– et bien sûr, $M = R + S$, la totalité des messages.

La courbe de la *figure 1.1* donne la distribution de la probabilité du temps de latence en fonction de celui-ci, dans le cas où la requête de transmission n'est demandée qu'une seule fois.

Figure 1.1



La valeur particulière t_{cycle} est le temps représentant un cycle moyen d'activité du réseau constitué de *M* messages de longueur temporaire *t* comportant *N* bits. Les courbes dépendent de la priorité des messages. La distribution de la probabilité de priorité « 1 » revient à 0 aussitôt après le transfert du message le plus long.

1.1.3 Contention au niveau bit

Ce principe CSMA/CA, utilisé dans le CAN (breveté dès 1975), de même type que celui de l'I2C, introduit quelques contraintes, d'une part dans la représentation du signal au niveau de la couche physique, et d'autre part en ce qui concerne la géométrie maximale « *l* » d'un réseau fonctionnant de cette façon.
Ainsi, pendant la phase d'arbitrage, de façon à avoir sur le réseau des bits de priorité élevée écrasant ceux de plus basse priorité, le signal physique sur le bus doit être :

– soit dominant[1], par exemple présence d'énergie, de courant, de lumière, de rayonnement électromagnétique ;
– soit récessif[1], par exemple : absence d'énergie.

Par définition, lorsqu'un bit dominant et un bit récessif sont simultanément transmis sur le bus, l'état résultant sur le bus doit être l'état dominant.

1. *Cf.* plus loin §1.3 *Petite rubrique « enrichissez votre vocabulaire »*.

1.1.4 Premières conséquences liées au débit et à la longueur d'un réseau

Voici maintenant quelques mots sur les conséquences de ce nous venons de présenter au paragraphe précédent (nous consacrerons une partie du chapitre 3 à cette question épineuse).

Nous savons que la vitesse de propagation des ondes électromagnétiques v_{prop} est de l'ordre de 200 000 km/s dans les lignes électriques filaires et les fibres optiques (ou encore, dit autrement, que les ondes mettent environ 5 ns pour parcourir 1 m, ou encore parcourent 200 m/µs).

Par principe, dans un système fonctionnant par contention de bit, un bit peut voyager d'une extrémité du réseau à l'autre avant qu'il ne soit détecté à son arrivée. Or, il se peut que, quelques « micro-instants » avant l'arrivée du bit à bon port, l'autre station, n'ayant encore rien vu arriver à ses bornes, décide de démarrer une émission dans l'autre direction. Choc frontal ! Catastrophe en vue !

Si l'on appelle *t-bus* le temps que met le signal pour parcourir la longueur maximale du réseau, la somme globale des temps d'aller et de retour dus à la propagation des signaux sur le bus est de :

$$2t\text{-}bus = 2\frac{l}{v_{prop}}$$

Par exemple, avec l = 40 m, on obtient *t-bus* = 200 ns.

Afin que la station ayant émis le bit initial soit apte à gérer les conflits, le temps que doit durer le bit, le *bit time t-bit*, doit être supérieur à *t-bus*. De plus, pour être complet, il est obligatoire de tenir compte des temps pris (ou nécessaire) pour échantillonner et traiter le bit dans la station où il arrive.

Pour évaluer le *bit time* minimal *t-bit-min* du réseau envisagé, il sera nécessaire (*figure 1.2*) de tenir compte des :

– retards de sortie de propagation *t-out*,
– retards d'entrée de propagation *t-in*,
– retards dus à la synchronisation *t-sync*,
– écarts de phases dus aux tolérances d'horloge *t-clock*,

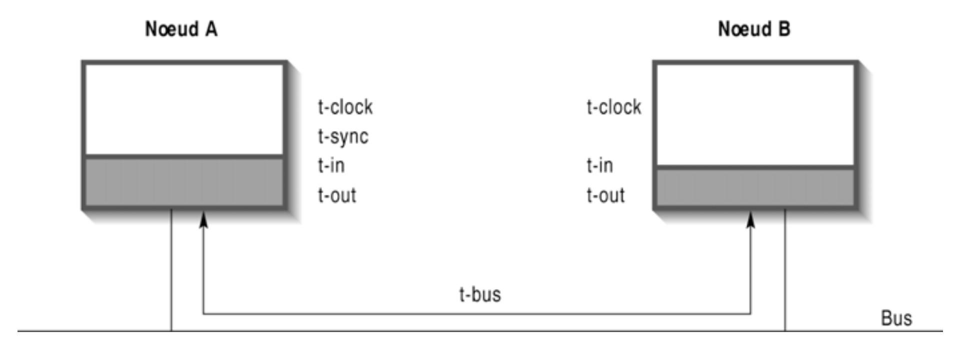


Figure 1.2

ce qui donne au total un *t-bit-min* de :

$$t\text{-}bit = 2\ t\text{-}bus + 2\ t\text{-}out + 2\ t\text{-}in + t\text{-}sync + t\text{-}clock$$

Exemple : avec un débit binaire de 100 kbit/s, soit un *bit time* de 10 µs, on peut atteindre une longueur de réseau d'environ 900 m.

Nous détaillerons toutes ces notions au chapitre 3.

1.1.5 Notion d'élasticité d'un système

La configuration architecturale et topologique d'un système distribué est généralement différente d'une application à l'autre et, pour une même application, elle peut même évoluer ou être modifiée dans le temps en fonction des besoins à satisfaire. Pour mieux nous faire comprendre, citons à titre d'exemple le cas des installations de chaînes de production industrielles qui, bien qu'ayant toujours le même aspect global, ont besoin d'être reconfigurées de temps à autre pour s'adapter aux produits à fabriquer. En ce qui concerne les systèmes ou les réseaux, on définit généralement par le terme « élasticité » (*scalability*) l'aptitude à tolérer un changement de configuration avec un minimum de reprogrammation possible concernant le transfert de données à effectuer.

Examinons un peu plus en détail les problèmes liés à l'élasticité d'un réseau.

L'information qui est reçue et traitée quelque part dans un système distribué doit être créée et transmise à une station. Il n'y a pas d'alternative logique en dehors de cela. Deux cas peuvent se présenter :

– On souhaite procéder à l'ajout de nouvelles informations. Toute nouvelle information requiert alors un nouveau transfert de message et, par conséquent, une reprogrammation de la communication. Dans ce cas, la station qui émettait précédemment cette information spécifique devra être reprogrammée en fonction de la nouvelle tandis que les autres stations resteront inchangées.
– Une situation différente se produit lorsqu'une information spécifique déjà existante doit être soit transmise à partir d'une autre station, soit reçue par des stations additionnelles. Dans ce cas, la station réceptrice additionnelle devra être reprogrammée pour recevoir l'information.

1.1.6 Implication de l'élasticité d'un système sur le choix du principe d'adressage

L'adressage classique, constitué généralement d'une adresse de « source » d'une part et d'une adresse de « destination » d'autre part, n'offre pas une bonne élasticité structurelle à un système. En effet, n'importe quels messages devant être reroutés nécessitent des modifications, même si cela n'est pas nécessaire logiquement, comme nous l'avons indiqué ci-dessus.

En ce qui concerne le concept CAN, dans le but d'assurer une bonne élasticité au système, il a été décidé d'utiliser un autre principe d'adressage, non plus basé sur des adresses de source et de destination mais sur le contenu du message lui-même.

Ceci implique deux choses :

– qu'un message soit transmis à toutes les autres stations du réseau (le terme consacré pour un tel principe est celui de « diffusion », *broadcast diffusion*) ;
– que le traitement de sélection du message transmis soit alors effectué par un filtrage dit « d'acceptance » à bord de chaque nœud station.

Pour ce faire, le message est étiqueté (possède un label) par un identificateur ID (i), qui sera alors comparé à la liste des messages reçus (ou que l'on désire recevoir) dans chaque station.

Cette liste contient des pointeurs d'adresses AP (i) vers le tampon de communication, de telle façon que le contenu du message puisse être stocké (*figure 1.3*).

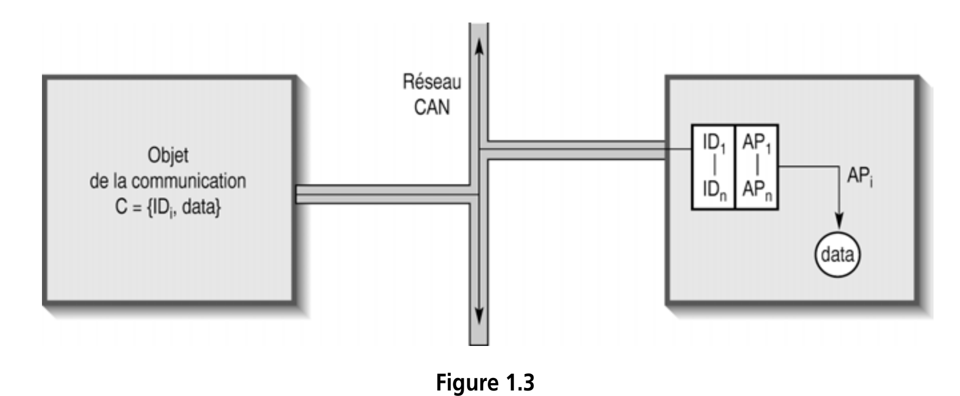


Figure 1.3

De ce fait, TOUS les messages sont simultanément reçus sur TOUTE l'étendue du réseau, et la consistance des données est alors garantie dans des systèmes de commandes distribués.

1.2 Traitement et gestion des erreurs

1.2.1 Notion d'acquittements positifs et négatifs

L'élasticité des systèmes et l'identification basée sur le contenu des messages compliquent le traitement des erreurs lorsqu'elles se produisent.

Une méthode classique de (non-)détection d'erreur réside par exemple en un renvoi d'acquittement dit « positif » de la station réceptrice vers la station émettrice, lors de la réception correcte d'un message. L'information-clé contenue à l'intérieur d'un tel acquittement positif est généralement celui de l'adresse de la station réceptrice.

Dans le concept CAN, cette notion d'adresse locale a totalement disparu et l'identificateur « étiquetant » le message est transmis à l'ensemble des participants et reçu partout dans le réseau. Cela impose l'exécution d'une tache locale, dédiée au traitement des erreurs dans chacune des stations présentes sur le réseau en l'absence de telles adresses de messages locaux. Pour satisfaire cela, le concept du protocole CAN utilise la combinaison d'acquittements positifs et négatifs.

L'acquittement positif ACK +, s'exprime sous la forme suivante :

ACK + = ACK + (i) quel que soit (i)

Il provient de toutes les stations (i) ayant correctement reçu le message, et exprimant cet acquittement (positif) pendant un même intervalle de temps bien défini (ACK *time slot*).

Le principe que nous venons de décrire peut aussi s'exprimer sous deux formes fondamentales :

– une vue optimiste du problème, dans laquelle on peut dire que l'acquittement positif indique « qu'au moins une station a reçu correctement le message » transmis ;
– une vue un peu moins optimiste (mais pas totalement pessimiste) : « l'acquittement négatif d'un message se doit de prendre une forme telle qu'il indique(ra) qu'il existe au moins une erreur dans le système global ».

Dans ce dernier cas, le message signalant la présence de l'erreur doit être envoyé sur le réseau juste après la détection de celle-ci. Cette technique permettra par la suite de garantir une resynchronisation immédiate du système à l'intérieur d'une seule trame de message. Ce dernier point est crucial pour la sécurité des applications considérées.

1.2.2 Gestion des erreurs

La combinaison, la redondance et l'analyse des acquittements positifs et négatifs provenant des dispositifs dédiés au traitement des erreurs des différentes stations sont exploitables et exploitées pour avoir de fortes présomptions sur la provenance d'une erreur (soit de la station émettrice, soit de l'une des stations réceptrices), par exemple :

– La présence d'au moins un acquittement positif provenant d'un récepteur, combiné à un message d'erreur, signifiera que le message a été au moins correctement transmis.
– Au contraire, l'absence d'acquittement positif avec un message d'erreur indiquera que toutes les stations réceptrices ont détecté une erreur, et qu'il y a une forte présomption (ou probabilité) pour que l'erreur soit localisée au niveau de la station émettrice.

1.2.3 Messages d'erreur

Les messages d'erreur retenus pour le concept CAN sont de deux types (*figure 1.4*).

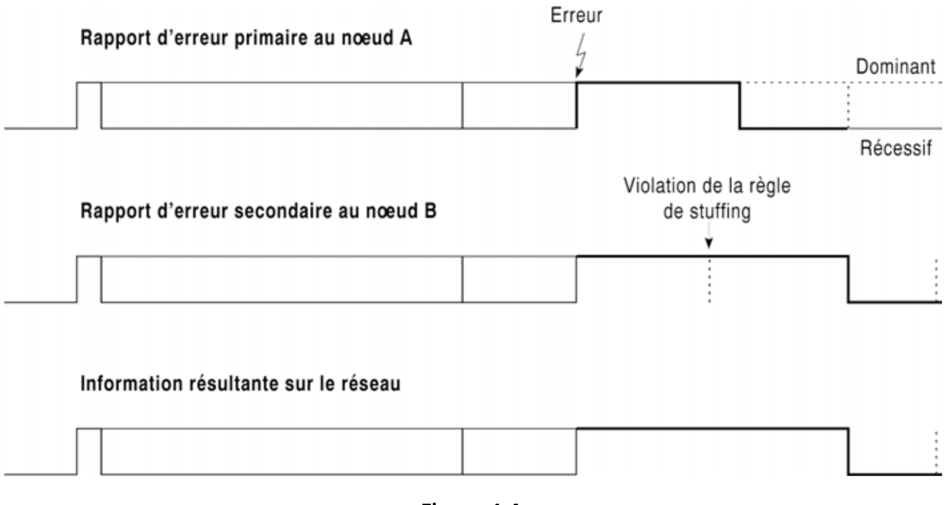


Figure 1.4

■ **Compte rendu d'erreurs primaires**

Une station (ou plusieurs simultanément) détecte(nt) une erreur, ce qui l'entraîne (ou les entraînent) immédiatement à transmettre un message d'erreur.
À ce moment-là, le message d'erreur consiste en une suite de bits dominants et le message en cours est avorté (non mené à son terme).

■ **Compte rendu d'erreurs secondaires**

Suite à cet avortement du message, toutes les autres stations détectant une violation des règles de format transmettent un message d'erreur de leur propre initiative, lequel se mélange avec le premier, ce qui a pour effet d'en étendre la durée.
Les comptes rendus d'erreurs primaires sont plus probables pour une station où l'erreur s'est produite que les comptes rendus d'erreurs secondaires qui sont générés en réaction de l'erreur citée précédemment.

1.2.4 Notion de stratégie de gestion des erreurs

Afin de gérer correctement les erreurs, le fin du fin dans un tel concept est de bâtir une stratégie concernant le traitement des erreurs. La qualité du traitement dépendra fortement de l'aspect volontariste ou non de la stratégie définie pour un champ d'applications données.
Pour le CAN, il a été défini (et nous y reviendrons très en détail au chapitre 2) une stratégie dite d'erreurs (ou fautes) de « confinement », dont les grandes lignes sont représentées sous forme graphique aux *figures 1.5* et *1.6*. Expliquons-les en deux mots.
Tout d'abord, chaque station se doit de posséder deux compteurs d'erreurs séparés : l'un pour noter ce qui se passe durant l'émission d'un message, l'autre pour effectuer une tâche similaire lors de la réception.
Cela étant, selon le type de compte rendu d'erreur et les conditions opérationnelles dans lesquelles se trouve la station à l'instant considéré, les compteurs s'accroissent avec des pondérations différentes selon certaines conditions, ou décroissent.
Ces compteurs ont pour mission de tenir compte d'informations provenant directement ou indirectement de toutes les autres stations. À l'aide de cet artifice, les compteurs effectuent une opération de « moyennage », donnant une approximation des valeurs statistiques de la qualité locale du réseau à un instant donné.
Afin de disposer quelques butées à cette stratégie, il a été aussi défini que si trop d'erreurs étaient attribuées par de tels moyens statistiques à une station spécifique, son état serait transféré d'un mode dit d'« erreur active » à un état dit d'« erreur passive », dans lequel elle ne continuerait plus à communiquer mais serait toujours active dans la gestion des erreurs pouvant se produire sur le réseau.
En présence d'erreurs de transmission trop nombreuses sur le réseau, celui-ci pourrait se bloquer, rendant alors tout trafic impossible !
Afin d'éviter cela, on est obligé de définir qu'au-dessus d'une certaine barre (fixée à 255 pour le CAN) la station passe dans un nouvel autre état dit de *bus off*, pendant lequel la station semble être déconnectée physiquement du bus afin de ne pas bloquer le bus pour quelques raisons que ce soit.